



광학적 과밀 상태에서의 일산화탄소 농도 분석에 관한 연구

유미연*

A Study on the Analysis of Carbon Monoxide Concentration in the Optically Thick Condition

Miyeon Yoo*

Received 17 September 2025 Revised 21 December 2025 Accepted 19 January 2026 Published online 1 February 2026

ABSTRACT TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) is in the spotlight because it can provide important information to the real-time operation of the system in a non-contact method. However, all analyzers have a measurement range. TDLAS also has difficulty in analyzing because the light absorption signal appears as an optically thick condition when the gas concentration fluctuation is large. In this paper, a solution to the problem is presented. As a result of reconstructing the light absorption distribution function through a numerical analysis algorithm that proposed the light absorption signal in an optically thick condition, the possibility of concentration analysis in an optically thick condition was verified by evaluating the error rate against a standard gas.

Key words Carbon monoxide(일산화탄소), Tunable diode laser absorption spectroscopy(파장가변형다이오드레이저흡수분광법), Optically thick condition(광학적 과밀 상태), Signal reconstructure(신호재구성), Concentration(농도)

Nomenclature

 ν_0 : center wavenumber, cm^{-1} k_ν : Spectral absorption coefficient, cm^{-1} S : linestrength, $\text{cm}^{-2}\text{atm}^{-1}$ P : Pressure, atm T : temperature, K I : transmitted laser intensity, V I_0 : incident laser intensity, V h : planck's constant, Js c : speed of light, cm/s k : boltzmann constant J/K E'' : energy level, cm^{-1} $\Delta\nu_c$: lorentz broadening, cm^{-1} $\Delta\nu_D$: gaussian broadening, cm^{-1} $\Delta\nu_V$: voigt broadening, cm^{-1} L : optical pathlength, cm M : molar mass, gmol^{-1}

Subscript

CO : carbon monoxide

TDLAS : tunable diode laser absorption spectroscopy

E/C sensor : electro-chemical sensor

DAS : direct absorption spectroscopy

FWHM : full width at half maximum

Senior Researcher, Korea Institute of Industrial Technology

*Corresponding author: myyoo@kitech.re.kr

Tel: +82-41-589-8575

DFB : distributed feedback Laser

DAQ : data acquisition system

MFC : mass flow controller

1. 서론

일산화탄소(CO)는 연소 과정에서 불완전 연소 시 발생하는 물질이며 독성 기체이다. 다양한 산업, 환경 및 생활 모든 영역에서 필수적으로 관리 해야 하는 물질이다. CO는 무색, 무취, 무미의 기체이며, 밀도는 표준상태(25°C, 1 atm)에서 약 1.145 kg/m³으로 공기 밀도인 1.225 kg/m³와 비슷하여 실내에서 쉽게 확산하므로 사람이 직접적으로 감지하기 어렵다.^[1] 따라서 연소 시스템의 성능 및 안전을 위해 CO 농도를 실시간으로 측정하는 다양한 방법이 연구 되어 왔다. 대부분의 측정 방식은 전기화학식(electrochemical, E/C) 센서로 측정하고자 하는 환경에 직접적으로 접촉하는 방식이라 Probe가 노출되어 내부 오염으로 인한 장기적인 측정이 불가능하다. 또한 가스를 포집하여 분석하는 방법이 기 때문에 분석값 도출까지 시간지연이 발생하여 시스템 변화와 위험한 순간에 즉각적인 대응이 불가능하다. 이를 해결하는 방법으로 파장가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법(Tunable diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)이 주목을 받고 있다. 해당 방법은 비접촉식 측정 방법으로 반영구적으로 사용할 수 있으며, 비포집(Non-Sampling) 측정 방식으로 실시간으로 빠른 분석이 가능하다. 또한 다양한 가스가 존재하는 환경에서 측정하고자 하는 대상 가

스의 파장을 직접적으로 선택하여 분석할 수 있으므로 높은 선택성과 정밀도를 가진다.^[2] 하지만 해당 방법에서도 측정 범위의 한계가 존재한다. 가스마다 특정 파수(파장)에서 측정 범위가 결정되며, 만약 저농도 측정 기준으로 파수를 선정하였다면 고농도 상태일 때, Fig. 1과 같이 나타나게 된다.

이는 측정 대상 환경의 높은 농도, 측정 거리, 온도 및 압력 등의 다양한 원인에 의해 발생하며, 이를 광학적 과밀 상태(Optically thick condition)라 한다. 온전하게 면적이 도출할 수 있는 기존 흡수 신호와 달리 불완전한 면적을 가진 광학적 과밀 상태에서는 해당 면적을 가지고 농도를 도출하기 불가능하여 정확한 농도 값을 계산하기 어려운 상황이다. TDLAS를 이용한 가스 농도 분석은 높은 선택성과 민감도로 인해 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으나, 광학적 과밀 상태에 도달할 경우 측정 대상 환경에 따라 분석 파장의 재선정이 필요하다. 이러한 경우, 기존 시스템에 적용된 레이저를 교체하거나 추가적인 광원을 도입해야 하므로, 측정 환경 변경에 따른 시간적 지연과 경제적 부담이 발생할 수 있다. 특히 농도 변동 폭이 큰 공정 환경에서는 이러한 제약이 TDLAS 적용의 실용성을 저해하는 요인으로 작용한다.

이와 같은 한계를 극복하기 위해서는 광학적 과밀 상태에서 측정된 흡수 신호를 재구성함으로써, 과포화된 신호로부터 신뢰성 있는 농도 정보를 도출할 수 있는 분석 방법이 요구된다. 해당 접근법은 추가적인 광원 변경 없이 단일 레이저를 활용한 농도 분석의 범위를 확장할 수 있으며, 이를 통해 TDLAS 기반 가스 센서의 적용 가능성과 실용성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이에 본 연구에서는 광학적 과밀 상태에서의 흡수 신호 재구성을 통해 가스 농도를 산출하는 분석 방법을 제안하고, 그 유효성을 실험적으로 검증하고자 한다.

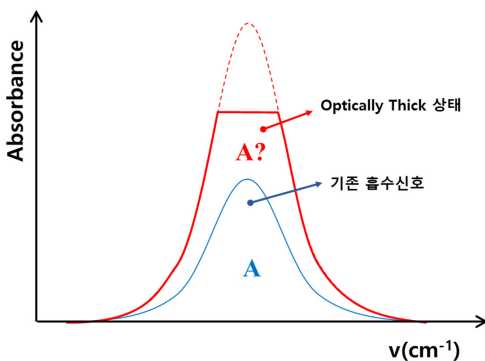


Fig. 1. Conventional optical absorption signal and Optically thick absorption signal

2. 이론

TDLAS 분석 방법 중 직접 흡수 분광법(direct absorption spectroscopy, DAS)은 투과된 빛의 흡수량을 이용한 Beer-Lamber's law를 기반으로 한다. 특정 파수(wavenumber,

cm⁻¹)에서 빛이 균일한 가스 매질을 통과할 때 식 (1)과 같이 초기 강도(I₀)와 투과 강도(I)의 비로 나타낼 수 있다.^[3]

$$T_v \equiv \left(\frac{I}{I_0} \right)_v = \exp(-k_v \cdot L) \quad (1)$$

T_v는 레이저 투과율을 나타내며, k_v[cm⁻¹]는 흡수계수 (Spectral absorption coefficient), L[cm]은 레이저가 지나간 광 경로 길이를 나타낸다. 스펙트럼 흡수계수인 k_v[cm⁻¹]는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$k_v L = P x_i S_i(T) \phi(v - v_0) \quad (2)$$

식 (2)에서 x_i는 흡수 가스 종의 몰 분율(mol fraction), P[atm]는 측정하려는 가스의 압력, S_i(T)[cm⁻²atm⁻¹]는 중심 주파수 v₀에서 가스 종 i의 온도(T)에 따른 선강도 (Linestrength),^[4] φ(v-v₀)는 선형함수(Line-shape function)를 나타낸다. 여기서 i는 특정 가스 종(Species)을 의미한다.

선 강도 S_i(T)는 식 (3)을 사용하여 구할 수 있으며, 여기서 Q(T)는 분배 함수(Partition function)의 의미 한다. h[J/s]는 플랑크 상수, c[cm/s]는 빛의 속도, k[J/K]는 볼츠만 상수, E^o[cm⁻¹]은 선택된 전이의 에너지 준위를 나타낸다.

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp \left[- \frac{hcE^o}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times [1 - \exp \left(\frac{-hc\nu_{0,i}}{kT} \right)] [1 - \exp \left(\frac{-hc\nu_{0,i}}{kT_0} \right)]^{-1} \quad (3)$$

분배 함수 Q(T)는 식 (4)와 같이 표현 가능하며 다항식을 사용하여 측정하고자 하는 곳의 온도 범위에서 결정된다.^[5]

$$Q(T) = a + bT + cT^2 \quad (4)$$

여기서 T₀는 초기 온도 296K를 의미하며, Table 1을 통해 특정 가스 종 기준으로 온도에 따라 계수가 정해지고 이를 통해 분배함수 계산이 가능하다.^[6]

그리고 얻어진 흡광도를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있는데, 이 면적을 통해 농도 값을 도출할 수 있다.

Table 1. Partition function coefficient of absorption molecule (¹²C¹⁶O)

CO(¹² C ¹⁶ O)				
Temp. (K)	a	b	c	Max. error (%)
L (70-500)	3.86E-01	3.61E-01	3.25E-06	0.07
M (500-1500)	2.813E-01	2.64E-01	8.89E-05	0.32
H (1500-3000)	8.597E-01	1.76E-01	1.22E-04	0.03

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} a_v dv = \int_0^L P x_i(z) S[T(x)] dz = P x_i S(T) L \quad (5)$$

식 (6)은 농도 분석을 위해 식 (5)를 정리한 식이며, 농도는 흡수 적분 면적에 비례하고 측정 구간 내 압력, 광 경로 그리고 선강도에 반비례함을 알 수 있다.^[7]

$$X = \frac{A}{PL\phi_v S(T)dv} = \frac{A}{P \cdot L \cdot S(T)} \quad (6)$$

일반적인 환경에서 각각의 분자들은 상호작용을 통해 다양한 선형함수 메커니즘을 형성한다. 첫째는 압력 조건에 큰 영향을 받으며 분자들 간의 충돌로 발생하는 pressure-broadened와 밀접한 관계 있는 Lorentzian 선형함수가 있고, 둘째는 온도에 지배적인 분자들 간의 열적 운동을 통해 형성되는 Doppler broadening에 해당하는 Gaussian 선형함수가 있다.^[8] 그러나 실제 환경에서는 가스 분자 측정 시 온도와 압력의 두 가지 영향을 동시에 고려해야 하므로 둘 중 하나의 선형함수로 표현하기에는 제한적이다. 그러한 이유로 일반적인 두 함수의 혼합 형태인 voigt 선형함수를 적용하였다. voigt 선형함수는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_v(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_D(u) \Phi_C du (v-u) \quad (7)$$

여기서 Φ_D는 Doppler broadening을 Gaussian 함수 형태로 나타낸 것이며, 식 (8)과 같이 표현된다. Δv_D(cm⁻¹)는 흡수 면적의 반치전폭(full width at half maximum,

FWHM)으로 식 (9)로 나타낸다.^[9]

$$\Phi_D(v) = \frac{2}{\Delta v_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{v - v_0}{\Delta v_D} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$v_D = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (9)$$

여기서 $M(\text{gmol}^{-1})$ 은 흡수 종의 물질량(molar mass)를 나타내고 Φ_C 는 Pressure-broadening으로 흡수 종들의 충돌과 측정 공간 내 압력에 지배되며 Lorentzian 함수 형태로 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$\Phi_c(v) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta v_c / 2}{(v - v_0)^2 + (\Delta v_c / 2)^2} \quad (10)$$

여기서 Δv_c 는 흡수 종의 충돌로 흡수 면적 선 형상 반치전폭을 나타내어 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.^[10]

$$\Delta v_c = P \sum (X_j 2\gamma_j) \quad (11)$$

이 식에서 $\gamma_j(\text{cm}^{-1}\text{atm}^{-1})$ 는 흡수 종들 간의 충돌이나 주변 간섭 종에 의한 충돌로 발생하는 broadening 계수를 나타낸다. 본 논문에서는 해당 이론을 기반으로 voigt 선형함수를 통해 광학적 과밀상태를 재구성하였다.

3. 실험 방법

3.1 파수(파장) 선정

본 연구에서는 근적외선 영역과 중적외선 영역에서의 흡수 신호 데이터를 비교 분석하기 위해 두 가지 파수를 선정하였다. Fig. 2와 같이 선정된 중심 파수는 $4,297.70 \text{ cm}^{-1}$ (R(10))이다.^[11]

해당 파수를 선정한 이유는 다음과 같다. 첫째, 선정된 파수 인근 영역은 다른 가스 종에 의한 분광학적 간섭이 상대적으로 적은 영역이다. 특히 CO 농도 측정은 주로 연소 환경을 대상으로 수행되므로, CO 이외의 연소 생성물에

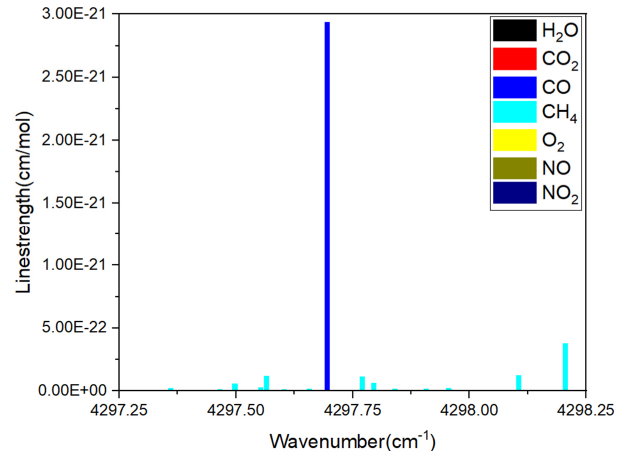


Fig. 2. Linestrength in Near-Infrared region (296K)

의한 간섭 가능성을 최소화할 필요가 있다. 선정된 파수 주변에는 메탄(CH_4)의 흡수선이 존재하나, 해당 흡수선의 선강도는 CO의 선강도에 비해 상대적으로 낮아 CO 농도 분석에 미치는 영향이 제한적인 것으로 판단되어 본 파수를 측정 파수로 선정하였다. 둘째, 단일 선강도로 구성된 흡수 신호를 분석 대상으로 하였다. 본 연구에서 적용한 신호 재구성 기법은 대칭적인 Voigt 선형함수가 기반이므로, 다중 흡수선이 중첩된 경우, 각 흡수선 간의 상호 영향으로 인해 Voigt 선형함수의 대칭성이 저하될 수 있다. 이러한 문제를 방지하고 재구성 과정의 신뢰성을 확보하기 위해, 단일 흡수선으로 구성된 흡수 신호를 측정 대상으로 선정하였다.

3.2 농도 도출을 위한 신호 재구성 방안

광학적 과밀 상태의 광 흡수 신호에서 농도 도출을 위한 방법으로 앞서 이론에서 언급한 voigt 선형함수를 이용하여 신호 재구성을 할 수 있다.^[12] 광학적 과밀 상태에서의 신호 재구성 알고리즘은 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다.

알고리즘에 대한 설명은 다음과 같다.

- (1) 실험을 통해 광 흡수 신호 취득($\alpha^M(v)$)
- (2) 광 흡수 신호 분석
- (3) (2)에서 분석한 값을 통해 광학적 과밀 상태 여부 판단
 - 광학적 과밀 상태이면 재구성 값과 비교를 위해 (c)로 이동

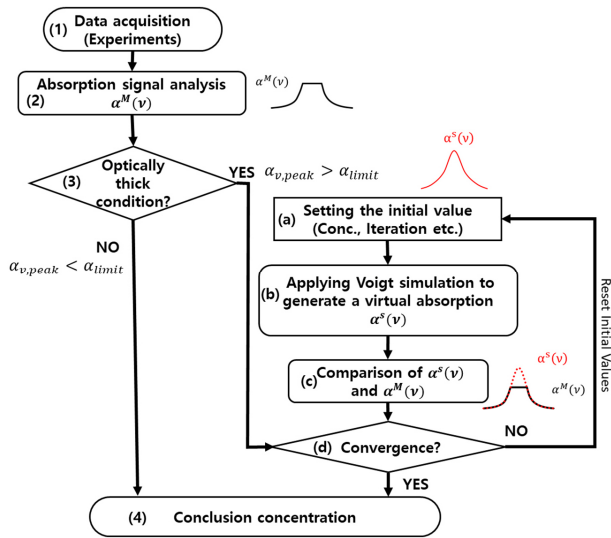


Fig. 3. Algorithm for Signal Reconstruction in Optically thick condition

- 광학적 과밀 상태가 아니면 (4)로 이동
- (4) 취득한 광 흡수 신호를 이용하여 농도 값 도출

광학적 과밀 상태의 광 흡수 신호를 취득한 경우는 아래와 같은 방법으로 진행된다.

- (a) 신호 재구성을 위한 초깃값 설정 후, 농도를 변화하여 재구성 준비
 - 초깃값 : 온도, 측정거리, 압력 입력
- (b) 해당 초깃값을 기반으로 voigt 시뮬레이션을 통해 재구성 신호 도출($\alpha^S(\nu)$)
- (c) (b)에서 도출된 재구성 신호는 측정을 통해 일부 얻은 광 흡수 신호 (3)과 비교 수행
- (d) 재구성 신호와 측정된 광 흡수 신호(3)과 수렴 여부 판단
 - 수렴 시, (4)로 이동하여 재구성한 신호를 이용하여 농도 값 도출
 - 수렴이 아닐 시, (a)로 이동하여 입력값 변경

먼저 광 흡수 신호 데이터를 취득하여 광학적 과밀 상태 여부를 판단한다. 광학적 과밀 상태가 아닌 경우에는 기존의 분석 방식을 적용하여 가스 농도를 산출한다. 반면, 광학적 과밀 상태의 광 흡수 신호에 대해 농도 값을 분석하기 위해서는 초기 설정 단계(a)에서 농도 값을 제외한 나머지

파라미터들을 정확한 값으로 입력해야 한다. 이후 재구성된 흡수 신호와 측정된 광 흡수 신호를 비교하는 단계(c)에서는, 재구성되는 흡수 신호의 반치전폭이 형성되는 높이까지의 구간을 기준으로 두 신호를 비교한다. 재구성된 흡수 신호와 측정된 광 흡수 신호의 일부 구간이 서로 수렴하게 되면, 재구성된 흡수 신호를 이용하여 흡수 신호의 면적 값을 도출할 수 있다. 이때 산출된 면적 값을 이용하여 가스 농도를 계산하고, 반복 계산 과정에서 도출된 이전 농도 값과 비교하여 그 차이가 설정된 오차 범위 이내인 경우 최종 결과로 판단한다. 만약 최종 단계에서 계산된 농도 값의 오차가 허용 범위를 벗어나는 경우, 초기값 설정 단계로 되돌아가 입력 파라미터를 재설정 후 동일한 과정을 반복 수행하여 결과를 도출한다. 이러한 반복 계산을 통해 얻어진 재구성 광 흡수 신호($\alpha^S(\nu)$)와 실험을 통해 측정된 광 흡수 신호($\alpha^M(\nu)$)는 Fig. 4와 같이 비교할 수 있다. 비교 과정에서는 광학적 과밀 상태가 발생한 구간을 제외한 나머지 데이터 영역을 대상으로 분석을 수행한다. 이때 비교 분석 범위는 측정 가능한 최대 흡광도의 절반에 해당하는 영역까지로 설정하며, 해당 범위에서의 residual을 Fig. 5와 같이 확인할 수 있다. 본 연구에서는 광 흡수 신호 재구성을 위해 Voigt 선형함수를 기반으로 한 피팅 기법을 적용하였다. 이는 앞서 이론적으로 언급한 바와 같이, Doppler 확장과 Lorentzian 확장을 동시에 고려할 수 있는 함수로서 다양한 실험 환경에서 발생한 스펙트럼 선형 변화에 대해 효과적인 모델링이 가능하기 때문이다. 또한 Voigt 선형함수

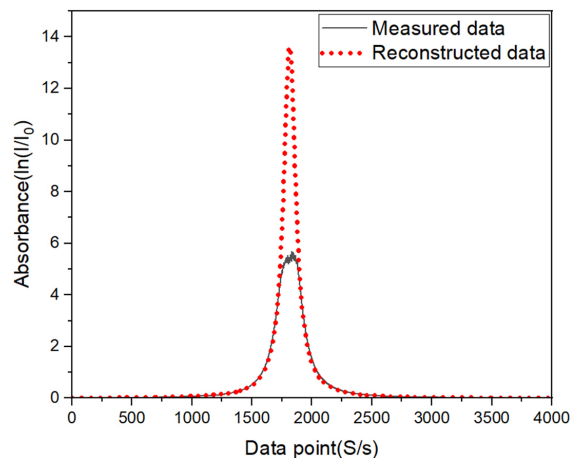


Fig. 4. Comparison graph of measured ($\alpha^M(\nu)$) and reconstructed ($\alpha^S(\nu)$) data

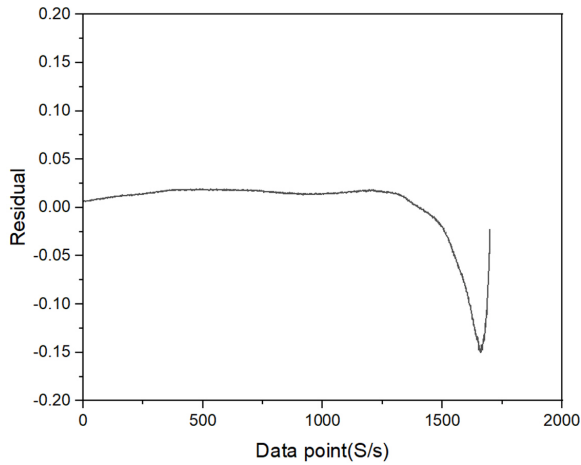


Fig. 5. Residual result graph

는 스펙트럼 해석 및 분석에 있어 높은 신뢰성을 제공하며, 실험 데이터 기반의 선폭 및 중심 주파수 추적에 널리 활용되고 있다. 이에 본 연구에서는 실험 환경을 고려한 최적 피팅을 위해 Voigt 선형함수 기반의 광 흡수 재구성 신호를 도출하였다.

3.3 실험구성

광학적 과밀 상태에서의 CO 가스 농도를 측정하기 위해 Fig. 6과 같은 실험 구성을 적용하였다. 본 실험에서는 중심 파수가 $4,297.70 \text{ cm}^{-1}$ 인 분포귀환형 레이저(Distributed Feedback Laser, DFB Laser, Nanoplus)를 광원으로 사용하였다. 해당 레이저의 구동을 위해 자체 제작한 레이저 제어 시스템을 사용하여 원하는 파장을 출력하였다. 레이저 제어 시스템은 레이저 마운트, 전류 제어 장치, 온도 제어 장치 및 함수 발생기(function generator)로 구성되어 있다. 전류 및 온도 제어를 통해 레이저의 중심 파장을 설

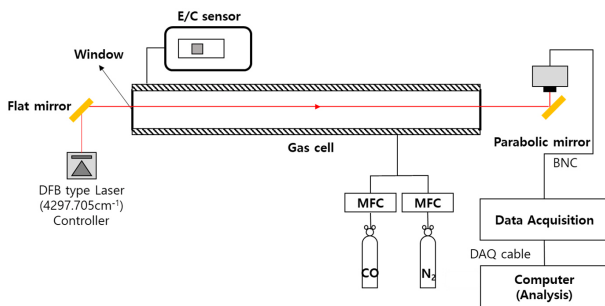


Fig. 6. Experimental schematic diagram

정하였으며, 함수 발생기에서 생성한 톱니(sawtooth) 파형을 레이저에 인가하여 측정에 필요한 파장 스캔 범위를 설정하였다. CO 가스 농도 조절을 위해 질량 유량계(Mass Flow Controller, MFC)를 사용하여 CO 가스와 질소(N_2) 가스를 혼합한 후 가스 셀에 주입하였다. 설정된 조건의 레이저 광은 가스 셀 내부로 조사되었으며, 가스 셀의 길이는 $1,700 \text{ cm}$ 이다. 실험은 상압(1 atm) 및 상온(296 K) 조건에서 수행되었다. 가스 셀을 통과한 레이저 광은 포물면 거울(parabolic mirror)을 이용하여 집광한 후, 광검출기(HgCdTe amplified photodetector, Thorlabs)를 통해 광 흡수 신호를 검출하였다. 검출된 신호는 데이터 수집 시스템(data acquisition system)을 통해 취득하였으며, 이후 MATLAB을 이용하여 신호 처리 및 분석을 수행하였다.

4. 실험 결과

Figure 7은 중심 파수 $4,297.70 \text{ cm}^{-1}$ 의 레이저를 이용하여 CO 가스 농도를 0.1%에서 20%까지 변화시켰을 때 측정된 실제 광 흡수 신호를 나타낸 것이다. Fig. 7은 CO 가스 농도별 광 흡수 신호를 비교하여 나타낸 결과로, 농도가 증가함에 따라 흡수 신호의 크기가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 특히 CO 농도가 8.0% 이상인 경우, 흡수 신호의 깊이가 급격히 증가하며 광학적 과밀상태가 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이, 광학적 과밀

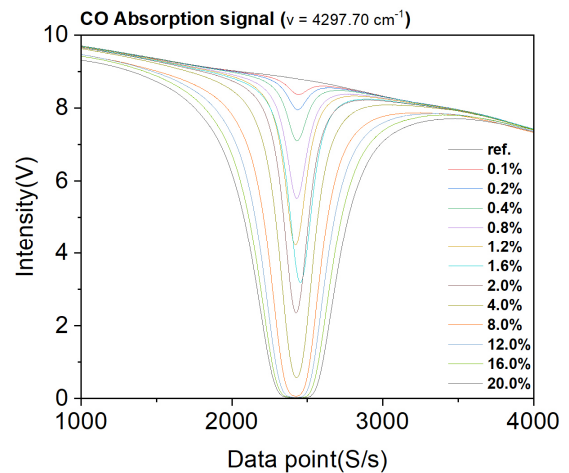


Fig. 7. CO optical absorption signal

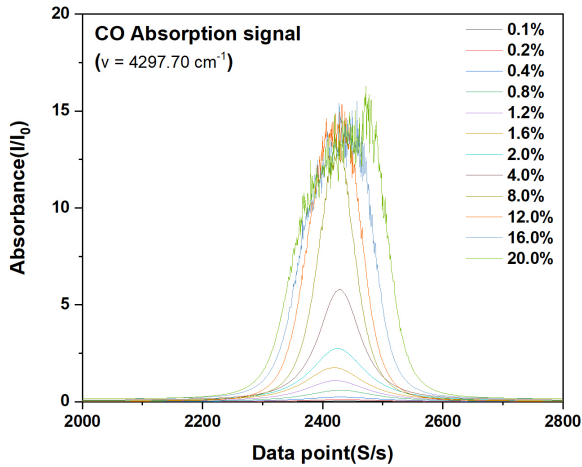


Fig. 8. CO absorbance signal

상태에서는 흡수 신호의 피크 값이 과포화되어 온전한 선형 흡수선 형태를 유지하지 못하며, 이로 인해 기존의 피크 기반 분석 방식으로는 정확한 농도 산출이 어려워진다. 본 연구의 목적은 이러한 광학적 과밀 상태의 흡수 신호를 분석하여 단일 레이저를 이용한 TDLAS 측정 가능 농도 범위를 확장하는 데 있다.

이에 따라 CO 농도 8.0% 이상에서 나타나는 광학적 과밀 상태의 흡수 신호에 대해 앞서 제시한 신호 재구성 알고리즘을 적용하여 농도를 산출하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 도출된 농도 값은 비교 검증을 위해 전기화

Table 2. Results of analysis by CO gas concentration

ref. gas (%)	TDLAS analysis (%) (4297.70 cm ⁻¹)	E/C sensor (%)
0.1	0.09	0.10
0.2	0.19	0.20
0.4	0.39	0.40
0.8	0.79	0.79
1.2	1.18	1.19
1.6	1.54	1.60
2.0	1.90	2.04
4.0	3.85	4.01
	Reconstruction analysis	
8.0	8.00	8.05
12.0	12.03	11.83
16.0	16.03	14.92
20.0	19.98	17.50

Table 3. Comparison error rate with reference gas

ref. gas (%)	TDLAS analysis (%)	Difference Error (%)	E/C sensor (%)	Difference Error (%)
8.0	8.00	0	8.05	0.6
12.0	12.03	0.25	11.83	1.4
16.0	16.03	0.18	14.92	6.7
20.0	19.98	0.1	17.50	12.5

학식(electrochemical, E/C) CO 센서의 측정 결과와 비교하였다. 비교에 사용된 전기화학식 센서는 최대 100 ppm 까지 약 95%의 신뢰도를 갖는 공인 인증 센서이다. Table 3에 나타난 결과를 살펴보면, 전기화학식 센서는 약 8.0% 농도까지는 측정이 가능한 것으로 나타났으나, 그 이상의 농도 영역에서는 측정 범위를 초과하여 농도가 증가할수록 오차율이 증가하는 경향을 보였다. 반면, 광학적 과밀 상태의 흡수 신호를 재구성하여 농도를 산출한 TDLAS 분석 결과는 최대 20%까지의 CO 농도 측정이 가능하였으며, 표준 농도 대비 평균 0.13%의 낮은 오차율을 나타내었다. 이러한 결과를 통해 광학적 과밀 상태에서 측정된 흡수 신호에 대해서도 제안한 신호 재구성 기법을 적용함으로써 신뢰성 있는 농도 분석이 가능함을 확인하였다.

5. 결론

가스의 농도 변동 폭이 큰 공정 환경에서는 단일 계측기로 전 농도 영역을 안정적으로 분석하는 데 현실적인 한계가 존재한다. 특히 TDLAS 분석 방식의 경우, 저농도 분석을 기준으로 파장을 선정하면 고농도 조건에서 광 흡수선이 과포화되어 광학적 과밀(optically thick) 상태가 발생하며, 해당 상태에서는 농도 산출 방법의 적용이 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 논문에서는 광학적 과밀 상태에서도 농도 분석이 가능한 신호 재구성 기법을 제안하였다.

본 연구에서는 CO 가스를 대상으로 광학적 과밀 상태에서의 흡수 신호를 측정하고, Voigt 선형흡수 기반의 수치 해석적 신호 재구성 알고리즘을 적용하여 온전한 광 흡수 분포를 복원하였다. 재구성된 흡수 신호의 적분 면적을 이용해 농도를 산출한 결과, 광학적 과밀도가 8.0% 이상인

조건에서도 표준가스 대비 평균 0.13%의 오차율을 확인하였다. 이는 기존 TDLAS 분석이 한계로 여겨졌던 광학적 과밀 영역에서도 정량적 농도 분석이 가능함을 실험적으로 입증한 결과이다.

본 연구의 결과를 통해 기존 TDLAS 분석에서 적용이 제한적이었던 고농도 또는 광학적 과밀 영역에 대해 농도 분석 가능성을 제시한다는 점에서 의의가 있다. 또한 복수의 파장 선택이나 추가적인 계측 장치 없이, 신호 처리 및 수치해석 기법을 통해 분석 범위를 확장할 수 있다는 점에서 실용적인 측면에서도 의미가 있다. 다만 본 연구는 특정 가스 종과 실험 조건에 한정되어 수행되었으므로, 향후에는 다양한 분자 종 및 환경 조건(압력, 온도)에 대한 적용성 검증과 함께 실시간 분석을 위한 연산 효율 개선에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기 획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20023296).

References

- [1] Wikipedia, 2025, “Carbon monoxide”, Accessed 09 September 2025, https://ko.wikipedia.org/w/index.php?title=%EC%9D%BC%EC%82%B0%ED%99%94_%ED%83%84%EC%86%8C&oldid=39011843.
- [2] Pogány, A., Wagner, S., Werhahn, O., and Ebert, V., 2015, “Development and Metrological Characterization of a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) Spectrometer for Simultaneous, Absolute Measurement of Carbon Dioxide and Water Vapor”, *Applied Spectrosc.*, **69**(2), 257-268.
- [3] Buchholz, B., Böse, N., and Ebert, V., 2014, “Absolute validation of a diode laser hygrometer via intercomparison with the German national primary water vapor standard”, *Appl. Phys. B*, **116**(4), 883-899.
- [4] Liu, X., Jeffries, J.B., and Hanson, R.K., 2007, “Measurements of spectral parameters of water-vapour transitions near 1388 and 1345 nm for accurate simulation of high-pressure absorption spectra”, *Meas. Sci. Technol.*, **18**(5), 1185-1192.
- [5] Gamache, R.R., Kennedy, S., Hawkins, R., and Rothman, L.S., 2000, “Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere”, *J. Mol. Struct.*, **517-518**, 407-425.
- [6] Gupta, A., Singh, P. J., and Udupa, D. V., 2022, “Polynomial expression for calculating “Total Internal Partition Sums” for portable gas sensors”, *Indian J. Phys.*, **96**(8), 2243-2261.
- [7] Zhou, X., 2005, “Diode laser absorption sensors for combustion control”, Ph.D. thesis, Stanford University, USA.
- [8] Hanson, R.K., Spearrin, R.M., and Goldenstein, C.S., 2016, “Spectroscopy and Optical Diagnostics for Gases”, Springer International Publishing AG, Cham (Switzerland).
- [9] Finn, G.D., and Muggleston, D., 1965, “Tables of the Line Broadening Function $H(a, \nu)$ ”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **129**(2), 221-235.
- [10] Vincenti, W.G., and Kruger, C.H., 1965, “Introduction to Physical Gas Dynamics”, Wiley, Hoboken and New Jersey (USA).
- [11] Gordon, I.E., Rothman, L.S., Hargreaves, R.J., Hashemi, R., Karlovets, E.V., Skinner, F.M., Conway, E.K., Hill, C., Kochanov, R.V., Tan, Y., *et al.*, 2022, “The HITRAN2020 molecular spectroscopic database”, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **277**, 107949.
- [12] M., Yoo, 2025, “Study on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for Accurate Analysis of Gas Concentration in Harsh Environment”, Ph.D. thesis, Chungbuk National University, Cheongju.